

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Disseny i prototipatge d'un
Estabilitzador per a càmera digital**

MEMÒRIA

Autor: Marc Soto Galindo
Director: Manuel Moreno Eguílaz
Convocatòria: Gener 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest projecte es mostra el procés d'estudi, disseny i desenvolupament d'un prototip d'estabilitzador motoritzat de tres eixos per a càmera digital. Es busca exposar quins han sigut els passos a realitzar des de la seva concepció fins la seva materialització, incloent-hi la cerca dels components, el disseny tridimensional, la fabricació, la configuració i el control per dispositiu mòbil. Es podria entendre aquest projecte com una guia per l'usuari que vulgui construir un estabilitzador igual o similar, exposant els punts de complexitat i pels quals s'ha passat per poder servir d'ajuda a futurs projectes.

En la part tècnica, es desenvolupa una aplicació per a dispositiu mòbil que servirà de complement al dispositiu per permetre un control a distància utilitzant un sistema semblant al de la realitat virtual. L'aplicació està dissenyada per a Android mitjançant la llibreria *Python 4 Android (sl4a)* i utilitza un sistema de Bluetooth implementat a l'estabilitzador per establir la comunicació amb el dispositiu mòbil. Es mostra també com ha estat la fabricació de l'estructura pas a pas, i quines ferramentes s'han utilitzat, així com les connexions fetes entre components electrònics.

Aquest projecte també contempla un estudi econòmic detallat, amb els costos de disseny, fabricació i de material, així com l'impacte mediambiental que pugui tenir el desenvolupament de l'estabilitzador. El resultat obtingut en el prototipatge, juntament amb unes possibles millores per al futur formen part d'aquest projecte amb l'idea d'incrementar les seves prestacions i capacitats dins del mercat específic d'aquest dispositiu.

Sumari

| | |
|--|-----------|
| SUMARI | 5 |
| 1. GLOSSARI | 7 |
| 2. PREFACI | 8 |
| 2.1. Origen del projecte | 8 |
| 2.2. Motivació | 8 |
| 2.3. Requeriments previs | 9 |
| 3. INTRODUCCIÓ | 10 |
| 3.1. Objectius del projecte | 10 |
| 3.2. Abast del projecte | 10 |
| 3.3. Planificació del projecte | 11 |
| 4. ESTABILITZADOR MOTORITZAT “GIMBAL” | 12 |
| 4.1. Models d'estabilitzador | 12 |
| 4.1.1. Professional | 12 |
| 4.1.2. Compacte | 13 |
| 4.1.3. Telèfon mòbil | 14 |
| 4.1.4. Càmera d'acció | 15 |
| 4.1.5. Dron | 15 |
| 5. ESTAT DE L'ART | 16 |
| 5.1. DJI Ronin-S | 16 |
| 5.2. Zhiyun Crane 2 | 17 |
| 5.3. Moza Air | 17 |
| 5.4. Projectes DIY | 18 |
| 6. DISSENY DEL PROTOTIP | 19 |
| 6.1. Circuit elèctric | 19 |
| 6.1.1. Sistema d'alimentació | 20 |
| 6.1.2. Sistema de control | 21 |
| 6.1.3. Sistema mecànic | 21 |
| 6.2. Estructura | 21 |
| 6.2.1. Selecció del material | 21 |
| 6.2.2. Disseny de l'estructura | 22 |
| 6.3. Disseny d'acoblament tridimensional | 23 |
| 7. ADQUISICIÓ DELS COMPONENTS | 25 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 7.1. | Planificació de la compra | 25 |
| 7.2. | Components principals | 25 |
| 7.2.1. | Microcontrolador i sensor IMU | 26 |
| 7.2.2. | Mòdul Bluetooth HC-06..... | 26 |
| 7.2.3. | Motors..... | 27 |
| 7.2.4. | Bateria | 28 |
| 7.2.5. | Placa d'alliberament ràpid..... | 29 |
| 7.2.6. | Joystick | 30 |
| 7.2.7. | Interruptor | 30 |
| 7.2.8. | Visualitzador de capacitat de bateria | 31 |
| 7.2.9. | Estructura..... | 31 |
| 7.3. | Connexions..... | 32 |
| 8. | MUNTATGE | 33 |
| 8.1. | Fabricació de l'estructura | 33 |
| 8.2. | Acoblament dels motors | 34 |
| 8.3. | Fixació per al microcontrolador i el sensor..... | 34 |
| 8.4. | Acoblament dels altres components electrònics..... | 35 |
| 9. | CONFIGURACIÓ I CONTROL PER DISPOSITIU MÒBIL | 37 |
| 9.1. | Configuració..... | 37 |
| 9.2. | Control per dispositiu mòbil..... | 38 |
| 9.2.1. | <i>Layout</i> | 40 |
| 9.2.2. | <i>Main</i> | 41 |
| 9.2.3. | Funcions | 42 |
| 10. | POSSIBLES MILLORES | 46 |
| 11. | PRESSUPOST | 48 |
| 12. | ANÀLISI AMBIENTAL | 51 |
| | CONCLUSIONS | 53 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 55 |
| | Bibliografia complementària | 58 |

1. Glossari

DIY [1]: fa referència a les sigles de l'expressió *Do It Yourself*, la qual representa el moviment artístic i/o tecnològic de fer les coses per un mateix; de fabricar o dissenyar prototips o dispositius amb les eines i materials que es tenen a disposició intentant recrear un producte de mercat amb un pressupost normalment més reduït.

Gimbal [2]: provinent de l'anglès, un *gimbal* és un dispositiu que consta de dos o tres anells pivotants en certs angles que dona una suspensió lliure en tots els plans per un objecte, en el nostre cas una càmera. També pot fer referència a un estabilitzador.

GUI [3]: de l'anglès *Graphical User Interface*, en català interfície gràfica d'usuari, és un sistema de comunicació entre l'usuari i el sistema informàtic per mitjà d'elements gràfics, sonors i de control, de manera que sigui més intuïtiva la forma d'interactuar amb el programa.

IMU [4]: prové de les sigles en anglès *Inertial Measurement Unit*, és un dispositiu electrònic que mesura la força específica, la rotació i, en ocasions, el camp magnètic aplicat a un cos per mitja d'acceleròmetres, giroscopis i magnetòmetres.

Joystick: prové de l'anglès i fa referència a una palanca de control. Sol estar format per un o més potenciòmetres i transmeten un senyal manual en digital. Poden disposar també de botons i és utilitzat en videoconsoles, grues, transbordadors espacials per fer accionar algun component a distància.

LED: de l'anglès *Light Emitting Diode*, és un dispositiu electrònic tipus díode, format per un material semiconductor, capaç d'emetre llum quan passa a través d'ell un corrent elèctric.

Stand by: prové de l'anglès, significa estar esperant i preparat per fer alguna cosa. S'utilitza en termes d'aparells electrònics quan el dispositiu es troba pràcticament apagat però amb una font de corrent alimentant-lo, de manera que la seva posada en marxa és ràpida.

Layout: prové de l'anglès, fa referència a l'estructura visual d'interfície d'usuari utilitzada en la programació. Fa de pont entre el programa i l'usuari, de forma fàcil i accessible per mitjà de la visualització estructurada de components en una pantalla.

Main: prové de l'anglès, fa referència a la part del programa que s'executa un sol cop, d'inici a fi i que compren totes les funcions d'inicialització, execució i aturada del programa.

2. Prefaci

Aquest projecte neix amb la idea d'aprofitar coneixements apresos durant el grau en assignatures com Electrònica, Mecànica, Màquines elèctriques, Expressió gràfica, Resistència de materials, Informàtica per desenvolupar un producte que pugui arribar a ser utilitzat un cop finalitzat. En aquest cas, es vol crear un estabilitzador o gimbal [2], un dispositiu pràctic per realitzar vídeos de millor qualitat.

La forma de desenvolupar aquest projecte s'aproxima al treball que va realitzar en Miquel Batalla Lapeyra titulat "*Longboard Elèctric. Disseny, motorització i control remot d'una taula convencional*" (2018) [5]. La idea de dissenyar un dispositiu electrònic i culminar-lo amb la implementació d'un prototip funcional és compartida en tots dos treballs, i ha servit de guia per realitzar aquest projecte.

2.1. Origen del projecte

Des de fa uns anys sóc un aficionat a la fotografia i a fer vídeos. Ser capaç de transmetre les emocions que un moment, un instant et produeix quan el vius o el sents és una cosa que sempre m'ha fascinat, i he envejat dels autors que, a través de les seves imatges, aconseguen captar la meva atenció i em feien voler semblar-me a ells. Vaig començar amb petites càmeres de foto i vídeo i vaig anar millorant l'equipament fins arribar on sóc ara. Disposo d'una càmera digital amb la qual tracto de transmetre les emocions que m'aporten allò que els meus ulls veuen. Però les ganes de continuar millorant sempre hi són i una manera de fer-ho, com molts professionals fan, és gravant vídeos amb moviment suau i estabilitzat. És per això que aquest projecte no solament assentarà i ampliarà els meus coneixements sinó que la fabricació d'un estabilitzador per a la meva càmera digital m'aportarà una eina molt valuosa a l'hora de crear vídeos.

2.2. Motivació

La motivació d'aquest projecte es tant poder aprendre com és el funcionament d'aquest aparell que sembla tant complex i que a preu de mercat ronda els 800 €, com mostrar-me

capaç de poder fer un disseny funcional a un preu bastant inferior. Tot i que segurament el producte no arribarà a compartir totes les possibilitats que ofereixen els gimbals més desenvolupats, el resultat que s'espera serà una gran millora a l'hora de gravar vídeos, ja que s'evitarà sostenir la càmera amb les mans, cosa que comporta moltes vibracions.

Les ganes de millorar a l'hora de fer vídeos i la possibilitat de confeccionar un producte que pugui utilitzar en el dia de demà també han servit de motivació per realitzar aquest projecte de la millor manera possible, afegint el màxim grau de complexitat a l'abast, per tal de no necessitar comprar un dispositiu que es presenta vital a l'hora de crear vídeos d'alta qualitat però que té un preu molt elevat.

2.3. Requeriments previs

Per poder realitzar un projecte d'aquestes característiques, és imprescindible tenir alguns coneixements sobre circuits elèctrics, mecànica i resistència de materials, així com de programació en Python. Degut a que el producte està motoritzat, s'haurà de desenvolupar un circuit elèctric que controli i transfereixi energia als motors que el faran funcionar. Per estalviar energia i optimitzar el rendiment, serà imprescindible fer un correcte balanceig de la càmera, així com conèixer el comportament de la càmera com un sòlid i els eixos necessaris per poder controlar el seu moviment. A causa del pes que comporta sostenir lliurement una càmera de fotos o vídeo, una correcta selecció dels materials a utilitzar es presenta vital per evitar deformacions i vibracions no desitjades, així com realitzar un disseny de prototipatge en 3D per poder confeccionar el dispositiu. A més, es requerirà de coneixements en programació per tal de poder fer un control del dispositiu per mitjà d'una aplicació de telèfon mòbil.

3. Introducció

A l'hora de dissenyar un estabilitzador existeixen moltes possibilitats i camins de desenvolupament que el poden fer tant complex com l'usuari decideixi. El món de la tecnologia és molt ampli, i sempre hi haurà diferents opcions de millora per incrementar les prestacions d'un dispositiu electrònic. Per aquest motiu és important definir d'inici quins seran els objectius i l'abast del projecte.

3.1. Objectius del projecte

Els objectius d'aquest projecte són comprendre com és i com funciona un sistema electrònic dissenyat per fer moure alternativament tres motors, quins components necessita i quins elements extres fan el sistema més pràctic per l'ús habitual. També es marca com a objectiu la fabricació d'un prototip útil que contingui tots els elements necessaris i que, per tant, estabilitzi la càmera de forma adequada durant la gravació, que sigui lleuger i pràctic per a la seva utilització a camp obert però també resistent. Així doncs, la càmera haurà de restar equilibrada i fer moviments suaus mentre es mou el dispositiu. Com a resultat, s'hauria d'obtenir un estabilitzador funcional, que sigui més econòmic que altres opcions que es troben al mercat, de tal manera que hi hagi cabuda per al desenvolupament del projecte.

3.2. Abast del projecte

Aquest projecte pretén donar a entendre els components que conformen el dispositiu, així com la seva utilització i muntatge per fer-lo funcional. No s'aprofundirà en el disseny de cada component, ja que cadascun d'ells comportaria un extens projecte, però sí en la implementació i l'aportació de cadascun.

En aquest projecte s'utilitzaran materials estructurals per a suportar els components i la càmera però no s'aprofundirà en fer un estudi sobre la selecció dels materials; sí que es mostraran les propietats i perquè els materials escollits són els adequats per a la seva utilització però no s'estudiaran possibles opcions que es podrien utilitzar per substituir o incrementar les prestacions que aquests donen. Altres materials que optimitzarien el pes o les

prestacions del dispositiu comportarien una dificultat addicional a l'hora de fabricar el prototip i un increment del preu.

3.3. Planificació del projecte

El projecte es basa en tres grans parts: la recollida d'informació, el disseny del prototip i la fabricació. La recollida d'informació es basarà en estudiar i documentar com funciona un estabilitzador, quins elements es necessiten i com funcionen, així com les diferents opcions que hi ha al mercat i quines prestacions donen. En quant al disseny del prototip, s'intentarà fer un dispositiu pràctic i funcional, determinant els components a utilitzar, de quina manera aniran connectats entre ells i com serà l'estructura que els suporti. Aquestes dues etapes s'han de fer el més aviat possible per tal de poder demanar els components necessaris per construir l'estabilitzador, ja que són elements que no es solen trobar en botigues convencionals, sinó que s'han de demanar sovint a fabricants estrangers.

Un cop el disseny i els components estiguin a la nostra disponibilitat, es podrà procedir a la fabricació del prototip, on s'inclou la seva configuració. És important conèixer les limitacions a l'hora de fabricar el dispositiu, ja sigui per disponibilitat de les eines que a utilitzar, el temps disponible o la complexitat de mecanitzar alguns materials.

També és evident, que durant el procés de fabricació del prototip, alguns aspectes del disseny original poden variar, degut a complicacions, millores o una segona opinió. Aquests canvis es tindran en compte a l'hora de presentar el disseny final, així com possibles futures millores del dispositiu.

4. Estabilitzador motoritzat “Gimbal”

Un estabilitzador motoritzat o gimbal és un dispositiu electrònic que suavitza o elimina les vibracions a les que està sotmesa una càmera quan es grava vídeo degut al moviment de qui la porta. Disposa de tres eixos motoritzats controlats per un microcontrolador que rep el senyal d'orientació de la càmera per mitjà d'un sensor IMU, format per giroscopis, i fa actuar els motors per corregir la posició. Per entendre el funcionament del dispositiu cal definir els eixos als quals actua: l'eix horitzontal, controla el moviment de dalt a baix (en anglès *tilt*); l'eix vertical, controla el moviment de dreta a esquerra (*pan*) i l'eix longitudinal o de rotació, el qual s'encarrega de controlar el nivell de la càmera (*roll*). Aquests corresponen als eixos d'Euler, amb els quals es pot posicionar i orientar qualsevol objecte en la direcció desitjada. Existeixen diversos modes de funcionament comuns en la majoria d'estabilitzadors: un mode de seguiment lliure, el qual segueix el moviment del càmera esmorteint els canvis de direcció; un d'orientació bloquejada, el qual manté la càmera apuntant cap a la mateixa direcció sigui quin sigui el moviment del càmera i un mode d'horitzontalitat, el qual permet el moviment de dreta a esquerra, fixant el moviment vertical. Tots tres modes mantenen la rotació de la càmera fixa, de manera que a l'hora de gravar l'horitzó quedi en posició horitzontal. També existeix el control manual per mitjà d'un joystick independentment del mode que s'utilitzi, que serveix per orientar la càmera en direccions verticals i horitzontals.

4.1. Models d'estabilitzador

Els models d'estabilitzadors depenen tant de la mida i el pes de la càmera, com de les prestacions que es volen assolir. Així doncs, al cinema i gravacions professionals s'utilitzen models voluminosos, d'alta qualitat, capaços de suportar càmeres de gran pes, mentre que per realitzar gravacions amb drons o telèfons mòbils s'utilitzen models més adequats a les circumstàncies per raons de mida, pes o preu. Avui dia, s'utilitzen molts exemples diferents segons la utilitat que es vol donar.

4.1.1. Professional

És un model d'ús professional, utilitzat en cinema, o anuncis comercials. Està format per una estructura robusta amb sovint dos o tres subjeccions les quals permet al càmera utilitzar les dues mans per una millor estabilitat, o fins i tot es pot subjectar al cos. Els motors

que el conformen són de gran potència, amb un parell mecànic elevat degut al pes de l'estructura i el microcontrolador de gran capacitat controla dos sensors de posició per una resposta ràpida i precisa. Un exemple d'estabilitzador utilitzat en la filmació professional és el Ronin 2 fabricat per la companyia DJI [6]:



Figura 1: Estabilitzador DJI Ronin 2. Font: [6]

4.1.2. Compacte

Disposa d'una estructura molt més simplificada que el model professional, amb una sola empenyadura. Pot suportar càmeres de pes prou elevat, abastant tot el rang de càmeres digitals d'ús amateur i professional. És un dispositiu molt adequat per viatjar, degut a que és més lleuger i sovint té una estructura desmuntable. No aconsegueix les prestacions que pot donar un estabilitzador professional però tot i així, s'assimila bastant i és més econòmic, cosa que el fa un dels més utilitzats per fer vídeos a nivell professional. Aquest tipus d'estabilitzador serà el que s'intentarà reproduir en aquest projecte i, com a exemple d'estabilitzador compacte ens fixarem entre d'altres amb el Zhiyun Crane 2 [7], un dispositiu molt versàtil i adequat per a càmeres digitals:



Figura 2: Estabilitzador Zhiyun Crane 2. Font: [7]

4.1.3. Telèfon mòbil

És un dispositiu de nivell amateur, per realitzar vídeos estabilitzats amb el telèfon mòbil. Sol ser més petit que un estabilitzador compacte i normalment està fet de plàstic, pel que és més lleuger i pràctic. És una gran opció per a viatgers que utilitzen el seu propi telèfon mòbil per enregistrar els llocs que viatgen, i fer-ho de forma més professional. Les prestacions que pot arribar a donar són prou bones i, sempre millorarà la subjecció manual. Existeixen moltes marques que fabriquen aquest tipus de dispositiu, de diferents qualitats i preus, de les quals en destaquem el DJI Osmo [8] per ser un estabilitzador de grans prestacions, molt lleuger i de mida reduïda:



Figura 3: Estabilitzador DJI Osmo. Font: [8]

4.1.4. Càmera d'acció

Similar al model per a telèfons mòbil, està dissenyar per estabilitzar càmeres d'acció per a esportistes o aventurers. Sol estar preparat per condicions on es pugui mullar i per ser acoblat en muntures específiques. Aconsegueix que l'usuari sigui capaç de gravar angles i perspectives diferents, de forma més atractiva, evitant gran part de les vibracions que poden ser ocasionades al fixar una càmera en un objecte mòbil. Un exemple d'estabilitzador per a càmeres d'acció és fabricat per la marca GoPro, la qual ha dissenyat el Karma Grip [9] com a complement per millorar l'estabilització de les càmeres que fabriquen:



Figura 4: Estabilitzador GoPro Karma Grip. Font: [9]

4.1.5. Dron

En el cas dels estabilitzadors per a drons, depèn molt la mida del dispositiu, ja que existeixen drons capaços de suportar càmeres professionals i d'altres que incorporen càmeres d'alta qualitat però amb una estructura molt petita. L'estabilitzador sol estar associat al dron i permet una gravació estable mentre el dispositiu es mou per l'aire en totes direccions. Solen ser el més lleugers possibles per evitar que es descarregui la bateria, que sol ser el punt més crític a l'hora de dissenyar un dron. Un dron que utilitza aquesta tecnologia per gravar vídeos d'alta qualitat és el Mavic 2 Pro de DJI [10]:



Figura 5: Estabilitzador incorporat al DJI Mavic 2 Pro. Font: [10]

5. Estat de l'art

En aquest apartat es vol mostrar quin és l'estat actual dels productes similars al que es vol realitzar que hi ha al mercat, mostrant exemples i característiques per tal de fer una comparativa amb el nostre producte. Si bé el rang de possibilitats per triar és bastant elevat i hi ha diferents marques que competeixen pel lideratge en quant a prestacions i disseny, també existeix el moviment anomenat DIY [1], que aporta solucions més econòmiques per a usuaris que vulguin fabricar el seu propi prototip. En aquest cas, ja que la intenció d'aquest projecte és dissenyar i fabricar l'estabilitzador, s'intentarà que aquest sigui el més semblant possible a un producte de venda afegint-hi la màxima complexitat possible tenint en compte les limitacions que puguin haver a l'hora de fabricar-lo.

Algunes de les opcions que el mercat ofereix per estabilitzar una càmera digital poden ser el DJI Ronin-S o el Zhiyun Crane 2, dos dels estabilitzadors compactes més moderns i més demandats degut a les grans prestacions que ofereixen. Una altra opció més econòmica que també ens pot servir de referència és el Moza Air. Els tres exemples seran comparats per tal de determinar les prestacions que haurà de tenir el nostre estabilitzador. També es donarà un cop d'ull a projectes DIY, que ens serviran de gran ajuda per comprendre com són dissenyats i fabricats alguns models fets per usuaris particulars.

5.1. DJI Ronin-S

En primer cas, el DJI Ronin-S, fet d'alumini, té una alçada màxima de 486 mm i un pes d'1,85 kg i suporta una càmera de fins a 3,6 kg. La bateria, recarregable i integrada al mànec, és de tipus LiPo (la bateria està formada per una solució de sals de liti en un polímer sòlid) de tensió de sortida 14,4 V amb capacitat de 2400 mAh i disposa d'un indicador de bateria per mitjà de 4 llums tipus LED. Controla tres motors gràcies a un processador digital de senyal de 32 bits i un sensor d'orientació IMU que rectifica les variacions dels eixos degut al moviment. Disposa de 3 modes d'utilització personalitzables, a més d'un control manual per joystick i una aplicació de dispositiu mòbil per configurar el dispositiu i controlar-lo. La càmera va connectada a l'estabilitzador, de manera que es pot tenir accés al botó de gravació i a l'enfoc des del mànec. El preu d'aquest dispositiu és de 749 € a la web oficial de la marca [11].

5.2. Zhiyun Crane 2

El segon exemple és el Zhiyun Crane 2. D'alçada 450 mm és lleugerament més compacte que el DJI Ronin-S i té un pes inferior, 1,25 kg. També està fabricat amb alumini i pot suportar càmeres d'un pes de fins a 3,2 kg. La bateria està integrada al mànec, però en aquest cas, està formada per 3 petites bateries en sèrie, recarregables de tipus LiPo que sumen una capacitat de 2400 mAh a una tensió de sortida de 11,1 V. Disposa d'un monitor OLED on es visualitzen els diferents modes de funcionament, així com l'estat de la bateria i la configuració. S'accedeix a través d'un conjunt de botons i rodes, i disposa també d'un joystick per fer un control manual del moviment de la càmera. Aquesta va connectada al dispositiu per mitjà d'un cable, i també disposa d'un control d'enfoc i gravació, així com una aplicació per a dispositiu mòbil. Els tres motors del dispositiu van controlats per tres microcontroladors de 32 bits cadascun, connectats en paral·lel, i un sensor d'orientació IMU. El preu de l'estabilitzador és de 559,90 € [7].

5.3. Moza Air

Per últim, el Moza Air, l'opció més econòmica, però també de gran qualitat, costa 499 € [12]. Com en els anteriors exemples, està fet d'alumini, té un pes d'1,1 kg i suporta una càmera de 3,2 kg. Disposa d'un set de 3 bateries LiPo integrades al mànec, d'una capacitat total de 2000 mAh. Els motors de l'estabilitzador són controlats per un processador digital de senyal amb un sensor d'orientació IMU i el control manual es pot fer a través d'un *joystick* incorporat al mànec juntament amb un botó d'encès i apagat i que canvia els diferents modes de configuració. Disposa d'una aplicació per a dispositiu mòbil amb la qual es pot accedir a la configuració i control manual.



Figura 6. Comparativa dels tres estabilitzadors: DJI Ronin-s, Zhiyun Crane 2 i Moza Air. Fonts [12], [7], [13]

5.4. Projectes DIY

Existeixen moltes maneres de dissenyar i fabricar un estabilitzador motoritzat, és més, cada usuari dissenya i crea el seu propi model amb els materials i eines que es sent més còmode o més a l'abast. La part més personalitzable és el suport, tant pel disseny com pels materials utilitzats. N'existeixen d'alumini [13], de fibra de vidre [14], de fibra de carboni [15], tot depenent de la mida de la càmera, la disponibilitat dels materials o l'aspecte que es vulgui donar. El que tenen tots els prototips en comú són: tres motors per fer moure els eixos, un microcontrolador connectat a un sensor IMU per controlar el moviment de la càmera i actuar sobre els motors i una bateria LiPo recarregable. La majoria també incorporen un joystick, ja que es una opció que va incorporada en molts microcontroladors per a estabilitzadors.

6. Disseny del prototip

Com s'ha pogut observar en l'apartat anterior, hi ha molts punts en comú entre els models mencionats. Tot i així, algunes prestacions són massa complexes per aquest projecte com el control total per dispositiu mòbil o l'acabat amb una estètica comercial, però podrien ser contemplades en futures millores. Així doncs, algunes de les característiques que haurà de tenir el nostre prototip són les següents:

- Estructura lleugera però suficientment rígida com per evitar vibracions que empitjorin el rendiment del dispositiu.
- Tres motors per articular l'estabilitzador.
- Microcontrolador de 32 bits amb sortida de control per a tres motors, entrades per a joystick i per a un sensor d'orientació IMU.
- Bateria de tipus LiPo recarregable d'una capacitat mínima de 2000 mAh.

A partir d'aquesta base, s'intentarà desenvolupar el màxim possible el prototip afegint-hi elements de millora que siguin útils a l'hora d'utilitzar-lo.

La càmera per a la qual es dissenya l'estabilitzador és una Sony $\alpha 7II$ amb un objectiu FE 3.5-5.6 / 28-70 de Sony [16]. El pes del conjunt és d'1,1 kg i les dimensions, aproximades a un prisma rectangular, són 140 x 100 x 150 mm. El pes i les dimensions seran importants a l'hora de dissenyar el prototip, ja que al ser d'us personal, es farà un estabilitzador a mida per millorar el rendiment d'aquest.

Per tal de confeccionar el prototip, serà important dissenyar el circuit electrònic que farà funcionar el dispositiu i l'estructura a la qual estarà adherit el circuit, desenvolupada paral·lelament amb un disseny d'acoblament en 3D per poder tenir en compte tots els components necessaris.

6.1. Circuit elèctric

El circuit elèctric és la base del funcionament del prototip. Per tal de que la càmera es mantingui estabilitzada, és necessari que els motors siguin alimentats i controlats de manera

correcta. Aquest circuit constarà de tots els elements que no tenen finalitat estructural, així com les connexions entre elements.

El circuit elèctric es pot entendre com tres sistemes que aniran connectats: el sistema d'alimentació, el sistema de control i el sistema mecànic.

6.1.1. Sistema d'alimentació

El sistema d'alimentació dissenyat és l'encarregat d'entregar energia al dispositiu per tal que aquest funcioni. Consta d'una font de corrent continu, en aquest cas, una bateria de tipus LiPo, recarregable gràcies a un circuit electrònic incorporat en la bateria que controla l'estat de les cel·les que la componen durant la recàrrega. També disposa d'una connexió de corrent continu tipus "jack" i un transformador per connectar el dispositiu al corrent i recarregar la bateria. Per poder controlar el corrent que entrega la bateria, es requereix d'un interruptor, ja que en cas contrari, quan es volgués deixar d'utilitzar el dispositiu s'hauria de desconectar la bateria del sistema de control. Incorporant un interruptor amb les característiques adequades permetrà amagar la bateria i les connexions per fer el disseny més atractiu i segur. A més de l'interruptor, ens interessarà introduir un sistema de visualització de l'estat de la bateria per saber la capacitat que resta. Això s'aconsegueix col·locant un visualitzador, programable segons el nombre de cel·les de la bateria, entre l'interruptor i el sistema de control, així el propi visualitzador s'encendrà i s'apagarà quan s'actui a l'interruptor.

El sistema es pot representar de forma esquemàtica de la següent manera:

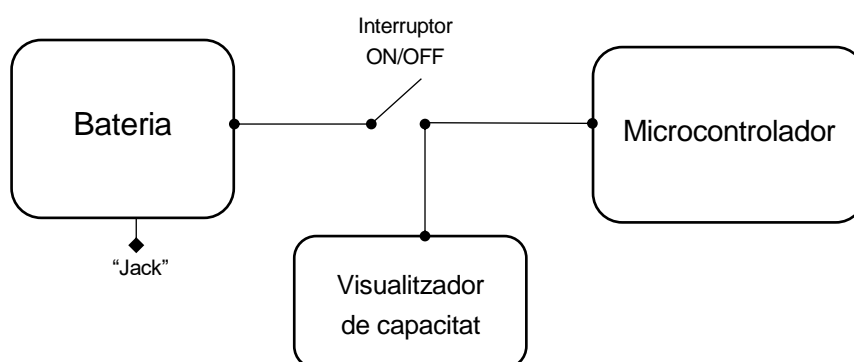


Figura 7. Representació esquemàtica sistema d'alimentació. Font: pròpia

6.1.2. Sistema de control

El sistema de control es basa en detectar el senyal del moviment de la càmera i distribuir la potència dels motors de forma adequada per què el sistema mecànic actuï correctament. El component principal és una placa electrònica amb un microcontrolador de 32 bits i, dissenyada per estabilitzadors de tres eixos. Incorpora un sensor d'orientació IMU format per giroscopis que detecten la rotació dels tres eixos del sensor i la transmeten al processador. Aquest s'encarrega de contrarestar aquestes rotacions fent actuar el sistema mecànic. Per a un control manual, un joystick format per potenciòmetres es connecta al microcontrolador i envia senyals que seran transmeses al sistema mecànic. A més, se li ha afegit un mòdul Bluetooth per tal de poder permetre una comunicació sense fils a distància a través d'un dispositiu mòbil.

6.1.3. Sistema mecànic

El sistema mecànic està format per tres motors brushless (sense escombretes) de corrent continu connectats al sistema de control. Els tres motors es situen als tres eixos de rotació de la càmera i articulen l'estructura. Degut al pes del conjunt càmera i estructura, es requereix d'uns motors amb parell elevat, d'altra banda, no és necessari que rotin a altes velocitats, ja que el moviment que realitzaran és un moviment curt i en ocasions oscil·latori.

6.2. Estructura

6.2.1. Selecció del material

A l'hora de dissenyar l'estructura de l'estabilitzador, s'haurà de garantir que aquesta sigui capaç de suportar el moment associat al propi pes de l'estructura i de la càmera. No només suportar el moment sinó evitar deformacions elàstiques que provocarien vibracions i un mal funcionament del prototip. Per tant, es requereix d'un material rígid però a l'hora lleuger, que sigui fàcilment mecanitzable i de preu no molt elevat. El material escollit és una aliatge d'alumini, concretament alumini 6061. Disposa d'un mòdul de Young de 69 GPa, bastant elevat que aporta rigidesa; un límit elàstic de 55 MPa; una densitat de 2,70 g/cm³, per tant es tracta d'un metall lleuger i el preu ronda els 80 €/m² (per un gruix de 6 mm). És més econòmic que altres metalls com l'acer o el titani. Altres opcions com la fibra de vidre o de carboni s'han descartat per dificultat de conformació, tot i que les seves prestacions són molt convenientes

degut a la gran rigidesa i baixa densitat.

6.2.2. Disseny de l'estructura

L'estructura d'alumini està formada per sis platines, unides en angle recte formant tres "Ls" i un mànec cilíndric. Els motors fan d'articulacions de l'estructura i, per garantir un bon ajust i equilibri, es requereixen de forats guies per col·locar els motors en els centres de gravetat. D'aquesta manera, s'aconsegueix que la càmera es mantingui fixa en qualsevol posició que s'orienti, aconseguint una simetria esfèrica. Per facilitar el muntatge de la càmera a l'estructura, una placa d'alliberament ràpid uneix les dues parts, de manera que és molt més àgil muntar i desmuntar la càmera de l'estructura i ens permet fixar la posició d'equilibri.

El gruix de les platines s'escull segons la normativa d'unions cargolades [17]. Per tal de minimitzar el gruix i, d'aquesta manera, el pes de l'estructura, es va triar fer les unions amb cargols de mètrica M2, els quals eren els de diàmetre més petit (2 mm) que estaven a disposició. La normativa fixa que la distància entre el centre del forat i el límit de la peça, en la direcció perpendicular a l'aplicació de la tensió, ha de ser d'1,5 vegades el diàmetre (1). Per tant, si el diàmetre del forat és de 2 mm, aquesta distància "e" ha de ser de com a mínim 3mm i, conseqüentment el gruix de la nostra platina ha de ser de 6mm, com es mostra a la Fig. 8.

$$e \geq 1,5 \cdot d \quad (1)$$

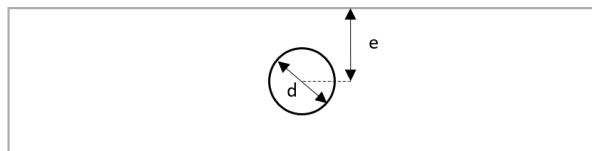


Figura 8: Dimensions forats. Font: pròpia

Per saber si aquest gruix és suficient i l'estructura no es deforma, es va procedir a fer un estudi de deformacions mitjançant SolidWorks. Es va considerar que la platina més propera al mànec és la que suporta un major esforç, degut a que ha de suportar el pes de la càmera, les altres platines i dos motors. Per una major seguretat, es va suposar un pes del conjunt de 2 kg, quan realment no supera els 1,5 kg. Al aplicar la força d'aquest pes a la superfície en contacte amb l'altra platina, que és la que li transmet l'esforç, es van obtenir les deformacions següents:

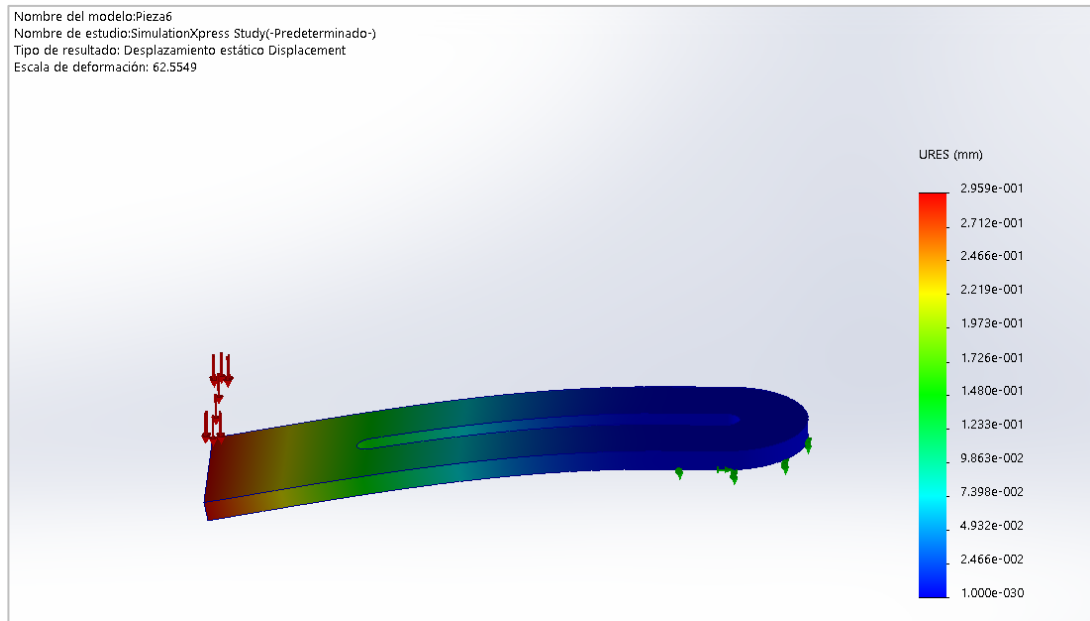


Figura 9: Estudi de desplaçaments de la platina. Font: pròpia

Com es pot observar a la Fig. 9, el punt de màxima deformació es troba on s'aplica la força i el seu desplaçament és inferior a 0,3 mm. Considerant que la peça mesura 185 mm de llarg, la inclinació que pot arribar a tenir és del 0,16%, el que ens dona un resultat que es pot donar per vàlid. Així doncs, el disseny inicial de les platines es dona per finalitzat a costa de futures iteracions per reduir el pes per mitjà de forats o un nou disseny més òptim.

Per altra banda, el mànec cilíndric necessita d'un compartiment per situar la bateria i el visualitzador de capacitat, el joystick, l'interruptor i el port per recarregar la bateria. D'aquesta manera, els elements del circuit electrònic es troben amagats, dona una millor aparença i més seguretat a les connexions. És necessari que sigui un disseny ergonòmic, ja que serà per on s'agafarà i es controlarà el dispositiu. Així doncs, el mànec ni ha de ser massa gran perquè llavors pesarà i ocuparà més volum, ni massa petit perquè ens podríem trobar amb incomoditats a l'hora d'agafar-lo i fins i tot propiciar una fractura o deformació. L'espessor haurà de ser de 6 mm, ja que també s'unirà amb la resta de l'estructura per mitjà de cargols M2.

6.3. Disseny d'acoblament tridimensional

Per tal de definir i comprovar les dimensions de l'estructura, tant de les platines com del mànec, s'ha dissenyat un prototip simplificat (sense tenir en compte unions per cargols i

connexions) de manera que representi i ens ajudi a confeccionar el dispositiu final. Per realitzar aquest disseny tridimensional (Figura 10) s'ha utilitzat el programa SolidWorks, amb el qual s'han introduït les dimensions de cada component i dissenyat les parts de l'estructura per tal d'aconseguir un disseny d'acoblament el més similar al que s'obtindrà al confeccionar el prototip. Una aproximació de com podria ser el disseny final del dispositiu, amb els diferents components situats, és mostra a continuació:

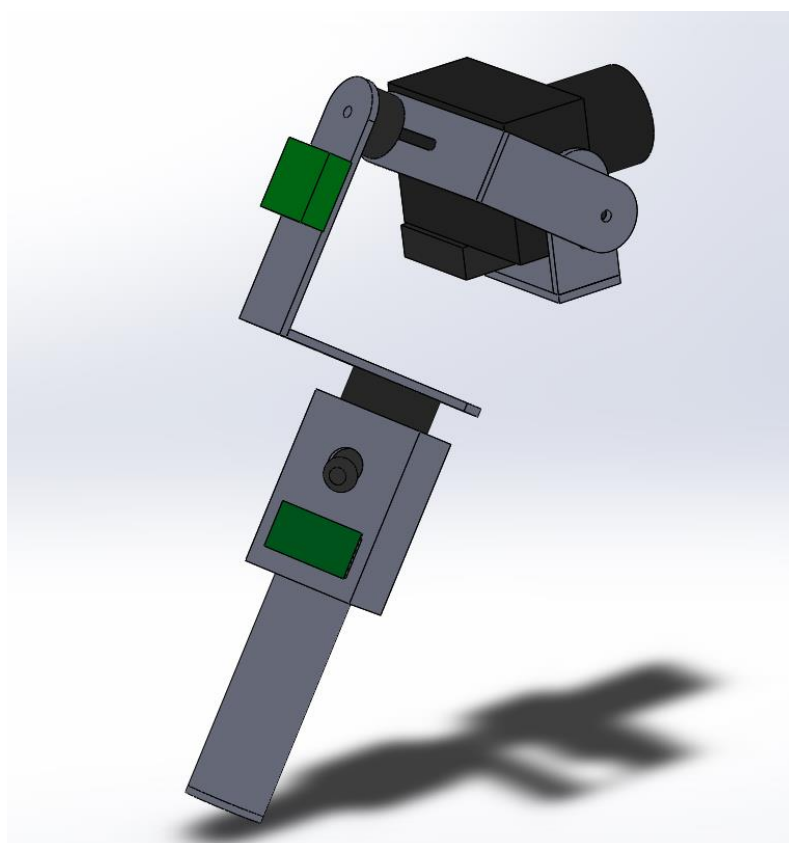


Figura 10: Disseny tridimensional assistit per ordinador. Font: pròpia

7. Adquisició dels components

Una part important del projecte és la fabricació i el correcte funcionament del prototip. Per tal de construir un dispositiu funcional, de manera que es gastí el menor pressupost possible, s'ha de realitzar un estudi sobre els components que s'han de comprar. S'haurà de fer una planificació del que es vol comprar, com es vol comprar i quan s'ha de comprar.

7.1. Planificació de la compra

A l'hora de planificar la compra dels components necessaris per fabricar l'estabilitzador motoritzat, s'han tingut en compte diversos factors com el preu, la disponibilitat i on es realitzava la compra. S'han considerat de més rellevància components difícils de trobar en tendes com els motors i el microcontrolador, específics per a estabilitzadors, la bateria de tipus LiPo de la capacitat i voltatge adequats, el visualitzador de capacitat de bateria o la placa d'alliberament ràpid. S'han comparat prestacions d'altres dispositius del mercat i s'ha avaluat el cost dels components.

Per més seguretat en la nostra compra, s'han utilitzat dos plataformes de compra online mundialment reconegudes com són Amazon i AliExpress, que ens garanteixen una entrega segura i puntual. Existien algunes opcions més econòmiques o més específiques per alguns components com HobbyKing o Turbohobby, que s'han descartat per evitar possibles problemes de transport o falta d'estoc.

Per altres petits components com cables, cargols, interruptors o connectors, s'ha decidit acudir a comerços locals, degut a la disponibilitat i l'experiència del venedor, que ha resultat útil a l'hora de comprar segons quin component.

7.2. Components principals

És important conèixer les propietats i el funcionament del que es vol comprar. Abans de realitzar qualsevol compra, s'ha hagut de pensar molt quines opcions de mercat hi havia, quines prestacions es requerien, com era el funcionament de cada element, quins eren els costos de transport i el període d'entrega i finalment decidir quina marca ens proporcionava el component més adequat per fabricar el nostre estabilitzador. Els principals components que

s'han comprat, que permeten el bon funcionament del dispositiu es mostren a continuació.

7.2.1. Microcontrolador i sensor IMU

El microcontrolador és una de les parts més importants de l'estabilitzador, ja que és l'encarregat de rebre els senyals de moviment i corregir-los adequadament amb la rotació dels motors. És convenient que tingui un port USB per poder programar-lo, així com ports de sortida per a tres motors i joystick. S'ha triat una placa amb microcontrolador STorM32 BGC de 32 bits de la marca Water&Wood, que està dissenyat específicament per un estabilitzador *gimbal* de 3 eixos, necessita un voltatge d'entre 9 i 18 V i té unes dimensions de 50 x 50 mm i un pes de 10 g. Incorpora un sensor IMU encarregat de donar el senyal d'orientació de la càmera al microcontrolador i una sortida per a control manual per joystick amb opció de pulsador, amb la qual es pot canviar el mode de funcionament. El preu del component és de 22,59 € [18].

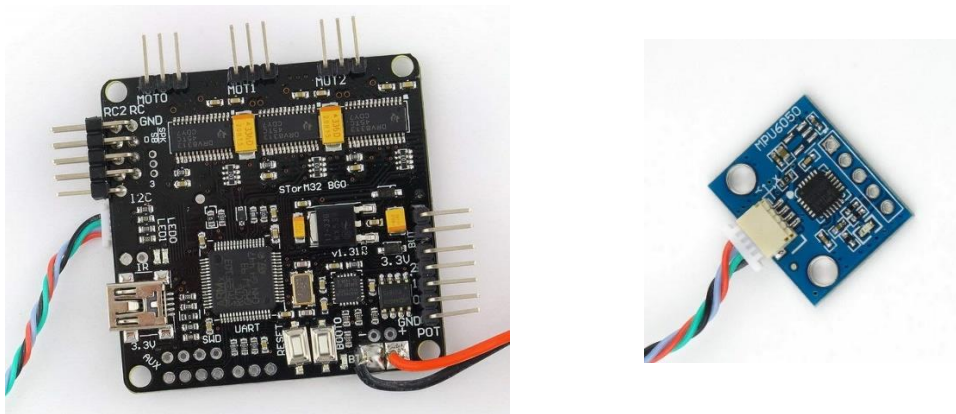


Figura 11: Microcontrolador STorM32 i sensor IMU. Font: [18]

7.2.2. Mòdul Bluetooth HC-06

Per poder fer un control del dispositiu i implementar algunes funcions a través d'un telèfon mòbil, és necessari un mòdul de connexió Bluetooth. El microcontrolador adquirit disposa d'uns pins específics per connectar un mòdul Bluetooth HC-06 Serial Transceiver i és per això que s'ha adquirit aquest component de la marca DSD Digital. El preu del component és de 8,49 € [19].



Figura 12: Mòdul Bluetooth HC-06 Serial Transceiver. Font: [19]

7.2.3. Motors

Els motors són els components encarregats d'articular l'estabilitzador per mantenir la càmera en una posició equilibrada o per rotar-la si se li ordena un moviment per mitjà del joystick. S'han hagut de buscar motors adequats al pes de la càmera i l'estructura, i després de veure recomanacions i altres projectes de fabricació d'estabilitzadors que es poden trobar a Youtube, s'ha decidit per adquirir tres motors de la marca iPOWER dissenyats específicament per estabilitzadors.

Dos d'aquests tres motors són del model GBM4108H-120T, de dimensions de l'estator 41 x 8 mm i 120 oz-in (*ounce inch*), el que representa un parell de 0,85 Nm. Segons les recomanacions, aquest model està dissenyat per a càmeres de l'ordre dels 600 a 1200 grams, s'alimenta a un corrent d'11,1 V, té una resistència d'11,2 Ω i pesa 98 g [20].



Figura 13: Motor sense escombretes GBM4108H-120T. Font: [20]

El tercer motor és del model GBM6324-180T, una mica més gran que els anteriors (dimensions de l'estator 52 x 8,5 mm) i amb un parell major, de 180 oz-in, el que correspon a 1,27 Nm. S'ha decidit adquirir un motor una mica més gran que els anteriors per col·locar-lo a l'eix vertical, degut a que és l'eix que suporta més pes, ja que segons les indicacions, és adequat per càmeres d'entre 1000 i 2000 grams. D'aquesta manera, ens hem volgut assegurar el correcte funcionament del dispositiu perquè, degut al pes de la càmera, de les platines i dels propis motors, es podien superar els 1200 grams, cosa que podria complicar el funcionament del dispositiu en cas que s'haguessin triat tres motors del model més petit. El pes d'aquest motor és de 190 g, s'alimenta a 12 V i té una resistència de 10,2 Ω [21].



Figura 14: Motor sense escombretes GBM6324-180T. Font: [21]

Els tres models disposen d'un forat a l'eix del motor per conduir els cables i poder girar els motors lliurement, cosa que el fa especial per a estabilitzadors. A més, incorporen 8 cargols M2 per fixar-los a l'estructura. El preu total del conjunt dels tres motors és de 85,35 €.

7.2.4. Bateria

El component que subministra energia al dispositiu és la bateria. S'ha escollit una bateria de tipus LiPo (Liti i Polímer) recarregable de la marca Kedanone, formada per tres cel·les de 3,7 V connectades en sèrie que donen un voltatge total d'11,1 V i té una capacitat total de 3000 mAh. Disposa d'un circuit integrat de protecció sobre l'excés de càrrega, descàrrega i curtcircuit i és capaç de lliurar un corrent de funcionament de 3 A i un corrent de pic màxim de 5 A [22].

Es va triar una bateria de 3000 mAh, quan s'ha vist en altres models que les capacitats rondaven els 2000-2400 mAh, perquè es va aprofitar una oferta d'estoc amb la qual incorporava una connexió de corrent continu tipus "jack" i un carregador de 12 V per connectar-lo a la xarxa per un total de 8,9 €. El pes de la bateria és de 150 g i té unes

dimensions de 69 x 62 x 22 mm.



Figura 15: Conjunt de bateria i carregador Kedanone. Font: [22]

7.2.5. Placa d'alliberament ràpid

Per tal d'unir la càmera a l'estructura, es va buscar un sistema d'alliberament ràpid que facilités el muntatge i desmuntatge i ens permetés fixar la posició d'equilibri de la unió, evitant la utilització d'un cargol que obligaria a corregir la posició cada cop que es cargolés la càmera a l'estructura.

Es tracta d'un sistema d'unió i alliberament ràpid per mitjà d'una palanca i està dissenyat per acoblar una càmera a un trípode i poder treure-la de forma ràpida i senzilla. És de la marca Konsait i està formada per dues parts que s'acoblen. Una part va unida a la càmera per mitja d'un cargol i l'altra part s'unirà a l'estructura per tal de fer l'encaix. Està fabricat d'un aliatge d'alumini i disposa d'una superfície de cautxú per no danyar la càmera, té unes dimensions de 79 x 20 x 69 mm que s'han tingut en compte a l'hora de dissenyar l'estructura i un pes de 144 g. El preu del component és de 10,99 € [23].



Figura 16: Placa d'alliberament ràpid Konsait. Font: [23]

7.2.6. Joystick

A l'hora de triar la palanca de control o joystick per al moviment manual s'ha buscat un que fos compatible amb el sistema de processat, de manera que disposés de potenciòmetres en els dos eixos, vertical i horitzontal i un pulsador per poder canviar de mode. A més, s'ha buscat que la mida del component fos el més petit possible, per poder introduir-lo al mànec del dispositiu. Finalment s'ha optat per un model per a *Play Station 2* de la marca RV77, ja que és compatible amb sistemes d'Arduino o el microcontrolador del que disposem. El preu del component és de 1,17 € [24].



Figura 17: Palanca de control o joystick RV77. Font: [24]

7.2.7. Interruptor

Per tal de tenir un control fàcil sobre la font d'alimentació i l'energia que subministra al dispositiu, s'ha decidit comprar un interruptor que fos capaç de suportar les especificacions del sistema electrònic. Per això, es requeria un interruptor que a 12 V fos capaç de suportar 5 A de corrent, ja que segons les característiques de la bateria aquest era el corrent de pic màxim que podia donar. Es va acudir a una botiga especialitzada en electrònica i es va adquirir el següent interruptor a un preu de 2,30 €.



Figura 18: Interruptor de palanca ON/OFF. Font: [25]

7.2.8. Visualitzador de capacitat de bateria

Per poder tenir un control del nivell de bateria del nostre dispositiu es va decidir incorporar un visualitzador de capacitat de bateria, el qual ens indiqués quina era la capacitat restant de forma visual. Es tracta d'un visualitzador programable segons el nombre de cel·les que té la bateria i ens indica amb un percentatge la capacitat que resta. Està dissenyat per voltatges d'entre 8 i 65 V (de 3 a 15 cel·les) i la seva programació és molt senzilla. Simplement s'ha d'indicar el primer cop que es connecta a quantes cel·les va connectat i automàticament ens indicarà la capacitat. El visualitzador s'il·lumina de color verd per una millor visió en condicions de fosc i entra en mode *stand by* passats 10 segons per gastar menys bateria. Té unes dimensions de 61 x 33 x 13,5 mm, és de la marca Sun3Drucker i té un preu de 6,99 € [26].

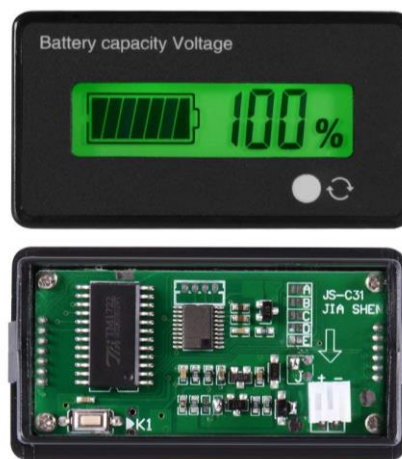


Figura 19: Visualitzador de capacitat de bateria Sun3Drucker. Font: [26]

7.2.9. Estructura

Un cop dissenyades totes les parts tant de les platines com del mànec, es va calcular la superfície plana requerida per tal de comprar una placa de 6 mm de gruix d'alumini i un tub d'alumini de les dimensions adequades. A partir del model aproximat del disseny 3D d'acoblament, es va obtenir una superfície de 92760 mm², que es va intentar distribuir de la forma més compacta fins arribar a obtenir una distribució del material requerit de la següent manera:

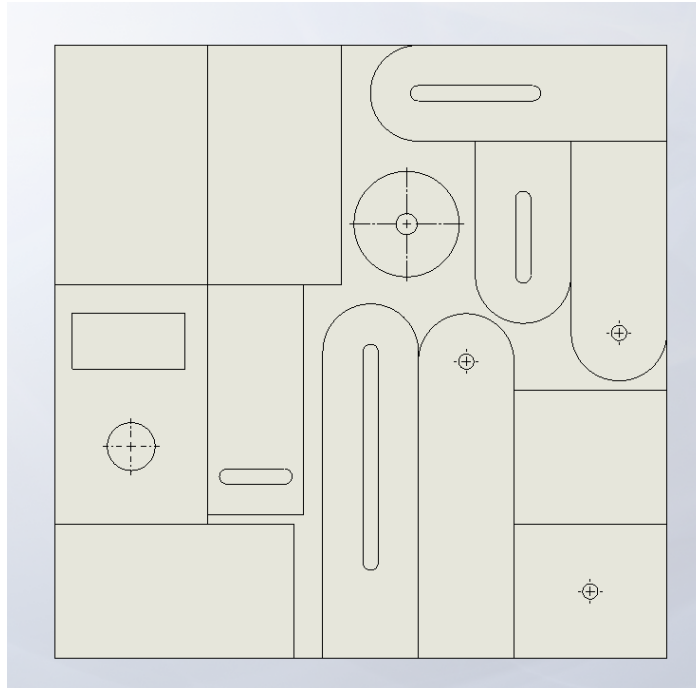


Figura 20: Representació de les peces necessàries sobre placa d'alumini. Font: pròpia

La placa d'alumini faria 320 x 320 mm² de la qual s'aprofitarien tant les cantonades com els talls per formar totes les peces. Això sí, s'haurà d'anar en molt de compte a l'hora de tallar la geometria, ja que fent-ho d'aquesta manera aconseguim reduir el material no utilitzat, comportant una reducció del cost del prototip, però pot provocar que alguna peça surti defectuosa i augmenti el cost a l'haver de d'adquirir més material. El preu de la placa d'alumini d'aquestes dimensions, amb el gruix específic de 6 mm, ha tingut un cost de 32,09 € [27].

7.3. Connexions

Per tal de fer les connexions entre components, tot i que aquests ja incorporaven cables de connexió, en molts casos s'hauran d'allargar el cable soldant o utilitzant regletes i elements de connexió mascle-femella per poder adaptar-los al disseny de l'estabilitzador. Així doncs, s'han hagut d'adquirir cables amb els extrems adaptats per a connexions d'Arduino (anomenats DuPont), que es poden adquirir en qualsevol botiga d'electrònica. El preu del components per realitzar les connexions va ser de 8 €.

8. Muntatge

Un cop rebudes les peces necessàries es pot procedir al muntatge de l'estabilitzador, intentant encaixar el màxim possible el prototip amb el disseny preliminar concebut. Durant aquest procés, ens trobarem en situacions on s'hauran de fer correccions del disseny inicial per tal de satisfer les necessitats de fabricació del prototip. Així doncs, s'hauran d'empalmar cables, subjectar components o fer forats a l'estructura per poder realitzar les connexions.

El muntatge del dispositiu consta de tres processos diferenciats, un d'ells tractaria de la fabricació de l'estructura a partir de xapes i tubs d'alumini, un l'altre procés faria referència al muntatge i realització de connexions dels components per integrar-los a l'estructura i, finalment, per obtenir un dispositiu funcional caldria fer un correcte calibratge dels eixos per equilibrar correctament la càmera digital.

8.1. Fabricació de l'estructura

A partir del disseny tridimensional de l'estabilitzador es van confeccionar unes plantilles a escala real per poder tallar cada peça de la xapa d'alumini. Utilitzant la distribució de peces mostrada anteriorment (Figura 20) es poden obtenir cada una de les platines i parts del compartiment del mànec, així com la tapa inferior, de manera que es desaprofiti el menor material possible. Per realitzar els talls s'ha utilitzat una serra per a metalls, per fer els forats un trepant amb broca per a metalls i, per poder després unir les parts de l'estructura per mitjà de cargols s'han utilitzat esquadres. A més, per suavitzar les arestes vives produïdes per la serra s'han polit mitjançant una llima metàl·lica.

En quant al tub cilíndric per confeccionar el mànec, s'ha decidit finalment eliminar-lo del disseny de l'estabilitzador. La principal raó per retirar aquesta part del dispositiu és que el propi compartiment podia fer la funció de mànec, deixant la part cilíndrica com un simple element estètic. Tant el joystick com l'interruptor es poden accionar mentre es subjecta l'estabilitzador pel compartiment utilitzant les dues mans. Aquesta part cilíndrica aportava pes i volum a l'estructura, cosa que anava en contra d'un dels objectius principals com és la fabricació d'un complement pràctic per la càmera.

Un cop confeccionades totes les parts de l'estructura s'uneixen per mitjà de cargols, femelles i esquadres, gràcies a que les parts a unir formen angles rectes, de manera que

s'obté un conjunt de tres "Ls" i un compartiment (inicialment obert per la part inferior per poder introduir la bateria, el joystick i altres components).

8.2. Acoblament dels motors

Per tal d'articular l'estructura, s'uneixen les tres "Ls" als dos motors més petits. El tercer motor va situat a la platina més gran i posteriorment farà d'unió articulada amb el compartiment. Per tal de poder balancejar correctament l'estabilitzador, a mesura que s'anava incorporant cada motor al dispositiu es muntava la càmera en posició, es buscava el centre de gravetat del conjunt i es feien forats a la posició corresponent. En alguns casos, s'han hagut de repetir els forats per tal de millorar l'equilibri de la càmera. El resultat final d'un bon balanceig ha de ser una situació en la que orientant la càmera cap a qualsevol direcció aquesta ha de mantenir-se sense desviar-se. Aquest ha sigut un procés difícil i laboriós del qual s'ha pensat una possible millora per tal de fer aquest pas més senzill i pràctic.

8.3. Fixació per al microcontrolador i el sensor

El mòdul amb el microcontrolador s'ha decidit situar-lo a la part posterior de la tercera "L" (en ordre creixent de mida), degut a que d'aquesta manera es troba situat el més a prop possible tant de la font d'alimentació com dels motors, evitant així fer unes connexions molt llargues i dificultoses. S'han hagut de fer 4 forats a la platina i unir el microcontrolador que porta una protecció de plàstic amb cargols i femelles.

Per incorporar el mòdul de suport inalàmbic Bluetooth HC-06 que permet rebre i enviar senyals des d'un dispositiu mòbil s'ha hagut de soldar a la part posterior de la placa, en la zona indicada, adaptada per aquest mòdul Bluetooth.

Per altra banda, el sensor s'ha situat alineant els eixos X i Y indicats pel sensor amb els eixos transversal i longitudinal de la càmera, a la platina que la subjecta. D'aquesta manera tots els moviments que pugui experimentar la càmera seran captats pel sensor i transmesos al microcontrolador. Per fixar-lo s'han hagut de fer dos forats a la platina i unir el sensor per mitjà de dos cargols i les corresponents femelles.

8.4. Acoblament dels altres components electrònics

En aquest subapartat es mostra com s'ha procedit a situar la bateria, el visualitzador de capacitat de la bateria, el joystick, l'interruptor i el port Jack per a recarregar la bateria. Tots aquests elements van integrats al mànec per tal que quedin protegits, així com les connexions entre ells.

La bateria s'ha fixat a la part posterior del mànec utilitzant cola instantània i reforç de cinta aïllant (que també serveix de protecció). En un principi es va pensar en fixar-la mitjançant una pistola de silicona però ens va preocupar el fet que la silicona adquireix una temperatura de 120 °C i les especificacions de la bateria indiquen que s'ha d'utilitzar entre un rang de temperatures de 0 a 60 °C. Degut a que es tracta d'un component que pot arribar a explotar si no es tracta de forma adequada, es va prendre precaució.

Per fixar el port "jack" a la tapa inferior s'ha utilitzat cola instantània i una escuma que venia en un dels embolcalls per mantenir el connector en posició vertical. Aquesta també s'ha enganxat a la tapa inferior per donar més rigidesa.

A la part frontal del mànec s'han situat el visualitzador de capacitat de la bateria, l'interruptor i el joystick. Per introduir el visualitzador de capacitat, s'ha aprofitat una aresta de la platina frontal per fer un forat amb les dimensions del component utilitzant la serra i la llima metàl·lica. Aquest va col·locat fent una lleugera pressió de tal manera que encaixi al forat i no caigui si es posa cap per avall. L'interruptor va situat en un forat de 10mm de diàmetre i unit a la platina frontal per un sistema de rosca i femella que disposa a la part superior. La palanca d'acció queda a l'exterior del compartiment i disposa d'un indicador amb les paraules "ON" i "OFF". Per tal de col·locar el joystick, s'ha hagut de fabricar i situar una platina a l'interior del compartiment a la qual va unida, per mitjà de cargols i rosques, la placa base del joystick. S'ha hagut de col·locar a la distància adequada per tal que la palanca de control es situés meitat a dins i meitat a fora, permetent així un correcte funcionament d'aquesta. Per poder utilitzar el joystick de forma adequada s'ha hagut de fer un forat d'uns 20 mm de diàmetre que permetés tot el recorregut dels potenciòmetres.

Amb tots els components i l'estructura muntats, després d'equilibrar el dispositiu i col·locar la càmera en posició, el dispositiu està llest per ser configurat i funcionar de manera adequada. A continuació es mostra una imatge del prototip en un estat molt avançat de fabricació on només falta situar el joystick en el forat corresponent (Figura 21). A més, en el

següent apartat també es mostrarà el que es requereix per poder controlar el dispositiu amb una aplicació de mòbil creada per l'usuari.



Figura 21. Prototip d'estabilitzador. Font: pròpia.

9. Configuració i control per dispositiu mòbil

9.1. Configuració

Un cop el dispositiu està muntat i els components connectats entre si, es pot accionar l'interruptor i posar en funcionament l'estabilitzador. Abans però, és convenient connectar el dispositiu per mitjà d'un cable USB a l'ordinador, instal·lar el driver o controlador de dispositiu i la GUI (Graphical User Interface) proporcionada pel creador del microcontrolador. D'aquesta manera, es pot fer la configuració inicial del dispositiu, entre d'altres indicant en quina orientació es troben els sensors, quin és el nombre de pols que té cada motor i una cosa molt important i que requereix de varies iteracions per aconseguir fer funcionar de manera adequada l'estabilitzador, com és la parametrització dels controladors PID de cada motor.

En aquest procés i com està explicat en la guia online [28], per a cada motor s'ha de configurar en primer lloc la velocitat màxima a la que funcionarà el motor, modificant així el parell que realitza; interessa que la velocitat d'actuació sigui la més alta possible, però sense perjudicar massa el parell de força del motor. Els resultats es poden observar al rotar manualment els motors; una bona configuració mostra una resistència al moviment considerable però permetent el gir del motor. Un cop configurada la velocitat màxima, és convenient posar els paràmetres P (proporcional) i I (integral) a zero per tal d'actuar només en el controlador derivatiu (D). Aquest s'encarrega de fer les correccions de posició del motor, observant-se així que, quan el paràmetre D és massa elevat s'escolten vibracions d'alta freqüència degut a la constant correcció de la posició. En aquest cas, ens interessa un coeficient que sigui el més elevat possible sense que pràcticament s'aprecii el soroll de correcció de la posició. Un cop s'ha trobat un coeficient del controlador derivatiu adequat, situant el coeficient integrador al valor més baix no nul (5.0), es van augmentant els valors del controlador proporcional fins a obtenir un moviment del motor constant i suau, sense vibracions considerables. Per acabar, es modifica el valor del coeficient d'integració per obtenir un moviment de resposta més ràpid però que no comporti vibracions. A la Revista de la Ingeniería Industrial es pot trobar un article que exposa el desenvolupament del controlador PID i la funció de cada component [35].

Un cop configurats els PID de cada motor, l'estabilitzador ja està llest per funcionar correctament. La càmera hauria de restar en la mateixa posició al modificar l'orientació de

l'estructura. Per defecte el mode de funcionament manté l'orientació fixa, però també es pot seleccionar per acompanyar el moviment de rotació en qualsevol eix de forma suau i estable modificant el mode a la GUI.

L'últim pas per millorar el funcionament de l'estabilitzador és fer un calibratge dels sensors que han de recollir l'orientació del dispositiu. Aquest pas es fa mitjançant la GUI en un seguit de sis passos o sis posicions en les quals s'ha de situar el sensor per tal de captar l'orientació de partida desitjada. D'aquesta manera, aconseguim que l'horitzó de la càmera estigui anivellat i els motors a posició.

9.2. Control per dispositiu mòbil

Com s'ha comentat anteriorment, aquest dispositiu disposa d'un mòdul de Bluetooth HC-06 soldat a la part posterior del microcontrolador per poder establir comunicació amb un dispositiu a distància. En aquest cas, farem servir un telèfon mòbil amb sistema operatiu Android per dissenyar una funció de control sense fils. La idea és dissenyar una aplicació que tingui un funcionament de background o per darrera d'una altra aplicació, i que identifiqui l'orientació del dispositiu mòbil per orientar l'objectiu de la nostra càmera. D'aquesta manera, l'usuari del telèfon podria escollir el moviment que realitza la càmera amb una espècie de realitat virtual. En concret, l'aplicació a la qual acompanyarà la nostra aplicació és la PlayMemories Mobile, que és l'aplicació que es connecta per wi-fi a la càmera i accedeix a visualització en directe i els botons de configuració. Combinant aquestes dues aplicacions, el que s'obtindrà és un control gairebé total de la gravació a distància, tant pel moviment de la càmera com el control d'inici i final de gravació, com per la configuració. L'únic procés que no podríem controlar amb aquest dispositiu ni amb el telèfon mòbil és el zoom de l'objectiu, en aquest cas, romandria constant durant tot el procés de filmació. A més s'ha incorporat l'opció de modificar el tipus de seguiment en tres models: seguiment bloquejat, anul·la qualsevol moviment de l'usuari per mantenir la càmera fixa; moviment horitzontal, fixa les rotacions del primer i segon motor i només permet un seguiment del moviment en el tercer motor; seguiment amb horitzó fix, la càmera en tot moment acompanya el moviment de l'usuari de manera estable mantenint sempre l'horitzó equilibrat. Aquest són els modes més utilitzats i per això s'ha considerat introduir-los.

Per fer l'aplicació mòbil ens hem ajudat en part d'un exemple d'Antonio Cheong [29], el qual recull la informació mostrada a la guia online [30] sobre com enviar comandes al

dispositiu per mitjà de Bluetooth. Ell utilitza *Python for Android (sl4a)* per fer una aplicació mòbil que modifiqui la configuració del dispositiu. En el nostre cas, el que es vol fer és anar un pas més enllà i utilitzar el dispositiu per controlar el moviment del dispositiu mitjançant els sensors propis del telèfon mòbil. Per tal d'establir comunicacions entre el dispositiu mòbil i el mòdul de Bluetooth es va haver de configurar per tal que el *baud rate* o velocitat de transmissió estiguessin en concordança. Per fer això, es va haver de connectar el dispositiu, amb el mòdul Bluetooth ja incorporat, a l'ordenador per mitjà del port USB incorporat, i per mitjà de la GUI, a l'apartat *Bluetooth Module Configuration Tool* segons el manual d'usuari trobat a la guia online [28]; introduir la comanda manual @dAT+BAUD8 per modificar el *baud rate* de 9600 a 115200 que és la velocitat de transmissió que envia el dispositiu mòbil i d'aquesta manera es va poder efectuar la comunicació entre components (Figura 22).

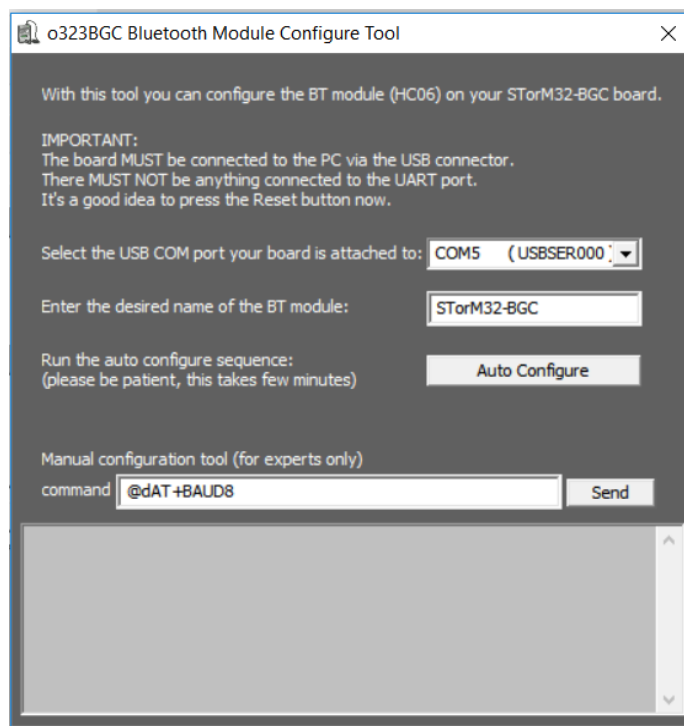


Figura 22. Bluetooth Module Configure Tool. Font: pròpia.

Un cop configurada la transmissió Bluetooth, el codi per enviar les comandes a l'estabilitzador es mostra estructurat en tres parts: el *layout* o part visual que es mostra a la pantalla, el *main* o procés que inicialitza, executa i tanca l'aplicació i les funcions a les quals es crida cada cop que hi ha un esdeveniment (nova senyal d'entrada).

9.2.1. *Layout*

El *layout* està format per un conjunt estructurat d'elements que interactuen amb l'usuari, com botons, imatges, gràfics o altres, de manera que aquest pugui utilitzar el programa informàtic i decidir sobre el seu funcionament. En aquest projecte, el *layout* està format per tres botons que corresponen a l'inici, el final i una opció de calibratge per redefinir el funcionament del dispositiu. El disseny és molt senzill, ja que l'aplicació està pensada per actuar darrere una altra, permetent així la utilització de l'aplicació corresponent a les diferents marques de càmeres digitals. Així doncs, un cop executat el programa, la pantalla del telèfon mòbil es mostraria de la següent manera:

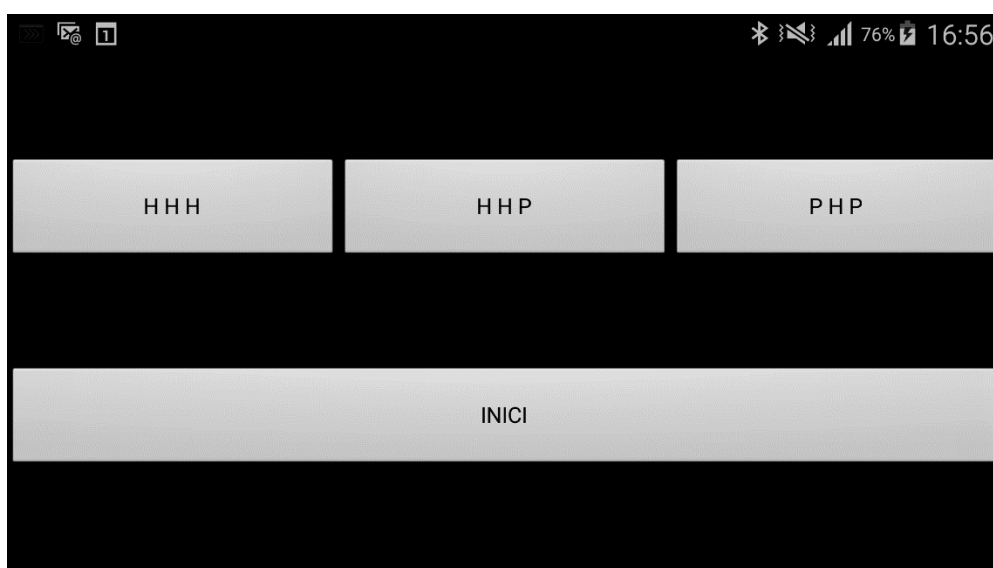


Figura 23. Captura de pantalla de l'aplicació. Font: propia.

El codi corresponent al *layout* està escrit utilitzant el llenguatge XML, de fàcil implementació i idèntic en quan a entrega, rebuda i processament de la informació al llenguatge HTML. Utilitzant aquest llenguatge s'ha aconseguit el disseny mostrat anteriorment escrivint el següent codi:


```

layout="""<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<RelativeLayout android:id="@+id/MainWidget"
    android:layout_width="fill_parent" android:layout_height="fill_parent"
    xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android">
    <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
        android:layout_height="fill_parent" android:orientation="vertical">
        <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
            android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
            android:orientation="horizontal">
        </LinearLayout>
        <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
            android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
            android:orientation="horizontal">
            <Button android:id="@+id/M1" android:layout_width="fill_parent"
                android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
                android:text="H H H" />
            <Button android:id="@+id/M2" android:layout_width="fill_parent"
                android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
                android:text="H H P" />
            <Button android:id="@+id/M3" android:layout_width="fill_parent"
                android:layout_height="fill_parent" android:layout_weight="1"
                android:text="P H P" />
        </LinearLayout>
        <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
            android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
            android:orientation="horizontal">
        </LinearLayout>
        <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
            android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
            android:orientation="horizontal">
            <Button android:id="@+id/M4" android:layout_width="fill_parent"
                android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
                android:text="INICI" />
        </LinearLayout>
        <LinearLayout android:layout_width="fill_parent"
            android:layout_weight="1" android:layout_height="fill_parent"
            android:orientation="horizontal">
        </LinearLayout>
    </LinearLayout>
</RelativeLayout>
""""

```

Figura 24: Programació del Layout. Font: pròpia.

9.2.2. Main

El *main* fa referència al procés d'execució de l'aplicació. En aquesta part, es defineix l'inici i finalització de les comunicacions entre l'aplicació i el dispositiu, així com la crida a la recollida d'esdeveniments. Els esdeveniments són el conjunt d'interaccions entre l'usuari i l'aplicació per mitjà de diferents canals d'entrada; en aquest cas, els esdeveniments s'introdueixen al prémer els botons dissenyats al *layout*. Cada botó correspon a una comanda que s'emmagatzema en forma de llista i que s'executa per la funció principal segons l'ordre d'entrada. El codi escrit per duu a terme el *main* es mostra a continuació:

```

droid = sl4a.Android()

uuid='00001101-0000-1000-8000-00805F9B34FB'
mac='20:17:03:08:74:67' #bluetooth module mac address

print("Try to connect BT ...")
try:
    bresult = droid.bluetoothConnect(uuid,mac)
    print("Connected")
    print(bresult)

    time.sleep(1)

    try:
        print(droid.fullShow(layout))
        eventloop()
    except:
        print("GUI Fail!")

except:
    print("Connect fail!")

droid.fullDismiss()
print("Try to stop BT and exit ...")
droid.bluetoothStop()
droid.exit()

```

Figura 25. Main del programa. Font: pròpia

En el *main* es pot observar com es crea una variable de tipus Android per poder fer compatible l'execució en aquest sistema i com es connecta al Bluetooth del mòdul HC-06 per mitjà de la seva adreça mac (personal de cada mòdul) i un codi que s'ha d'introduir per poder fer la comunicació. A partir d'aquest moment, els dispositius estant enllaçats i es poden transmetre comandes. El que es fa a continuació és mostrar el *layout* en pantalla i executar la funció de recollida d'esdeveniments. Un cop l'usuari decideix tancar l'aplicació, el codi s'encarrega de finalitzar les comunicacions.

9.2.3. Funcions

En aquest apartat es mostren les funcions utilitzades per enviar les comandes a l'estabilitzador de manera que la comunicació entre telèfon i dispositiu sigui l'adequada. Per poder enviar una comanda, cal que aquesta vagi codificada en un llenguatge concret, proporcionat per la Guia d'usuari [31]. Aquestes comandes estan formades per un *string* o paraula que identifica si la comanda és enviada o rebuda, un terme amb la longitud en bytes

de la comanda, un terme que representa l'acció que ha de fer el dispositiu, els valors dels paràmetres a modificar i un terme per validar que la comanda enviada és la corresponent utilitzant un sistema de codi detector d'errors del tipus cyclic redundancy check (CRC) [32]. Aquesta tipus de codificació es troba representat en les següents funcions, juntament amb un sistema d'estructuració de dades:

```
def pwm2b(pwmv):
    return struct.pack('I',pwmv)[:2]

def f2b(fn):
    return struct.pack("f",fn)

def crc_accumulate(b,crcTmp):
    tmp = 0
    tmp = ( b ^ ( crcTmp & 0xff ) ) & 0xff
    tmp = ( tmp ^ ( tmp<<4 ) ) & 0xff
    crcTmp = ( (crcTmp>>8) ^ (tmp<<8) ^ (tmp<<3) ^ (tmp>>4) ) & 0xffff
    return crcTmp

def crc(bstr):
    crcTmp = 0xffff
    for b in bstr :
        crcTmp = crc_accumulate(b,crcTmp)
    return struct.pack('I', 0xffff & crcTmp)[:2]
```

Figura 26. Funcions de codificació de comandes. Font: pròpia.

Les funcions que s'han dissenyat per fer el control de moviment amb dispositiu mòbil, modificar el tipus de funcionament , fer el calibratge del punt inicial i modificar la posició rebent la configuració d'angles del telèfon utilitzen la llibreria *sl4a* per obtenir i tractar les dades. El codi d'aquestes funcions es mostra juntament amb una funció que escriu la comanda al dispositiu enviant-la pel mòdul Bluetooth i llegeix el missatge de rebuda:

```

def sgdata(outbyte,waittime):
    try:
        outstr = base64.b64encode(outbyte).decode("utf-8")
        droid.bluetoothWriteBinary(outstr)
        if(waittime==0):
            waittime=0.1
        time.sleep(waittime)
    except:
        print("Send fail!")
        droid.fullSetProperty("volinfo","text","Send fail!")

def CMD_SETANGLE(pitch,roll,yaw):
    outmp = b'\x0e\x11' + f2b(pitch) + f2b(roll) + f2b(yaw) + b'\x00\x00'
    outmp = b'\xfa' + outmp + crc(outmp)
    sgdata(outmp,0.1)

def CMD_SETPITCHROLLYAW(ppwm,rpwm,ypwm):
    outmp = b'\x06\x12' + pwm2b(ppwm) + pwm2b(rpwm) + pwm2b(ypwm)
    outmp = b'\xfa' + outmp + crc(outmp)
    sgdata(outmp,0.1)

def CMD_SETPANMODE(bstr):
    outmp = b'\x01\x0D' + bstr
    outmp = b'\xfa' + outmp + crc(outmp)
    sgdata(outmp,0.1)

```

Figura 27. Funcions de comunicació bluetooth i de configuració. Font: pròpia

```

def GETANGLES():
    global sensing
    dt = 100
    stp=CALIBRATE()
    while sensing:
        droid.startSensingTimed(1,5)
        time.sleep(dt/1000.0)
        s5 = droid.sensorsReadOrientation().result
        droid.stopSensing()
        ori=[s5[0]*180/3.1415,s5[1]*180/3.1415,s5[2]*180/3.1415]
        CMD_SETANGLE(ori[2]-stp[2],stp[1]-ori[1],ori[0]-stp[0])

def CALIBRATE():
    droid.startSensingTimed(1,5)
    time.sleep(1)
    s5=droid.sensorsReadOrientation().result
    droid.StopSensing()
    startingpoint=[s5[0]*180//3.1415,s5[1]*180//3.1415,s5[2]*180//3.1415]
    return startingpoint

```

Figura 28. Funcions del mode. Font: pròpia

Finalment, la funció “eventloop” és la que s’encarrega de recollir les entrades o interaccions de l’usuari amb el dispositiu mòbil per aplicar la comanda desitjada, cridant a les funcions que pertoquin:

```
def eventloop():
    global sensing
    while True:
        try:
            event=droid.eventWait(50).result
            if event != None:
                print(event)
                if event["name"]=="key":
                    droid.vibrate(30)
                    if event["data"]["key"] == '4':
                        return
                elif event["name"]=="screen":
                    if event["data"]=="destroy":
                        return
                elif event["name"]=="click":
                    if event["data"]["id"]=="disconnectexit":
                        return
                    elif event["data"]["id"]=="M1":
                        CMD_SETPANMODE(b'\x02')
                    elif event["data"]["id"]=="M2":
                        CMD_SETPANMODE(b'\x01')
                    elif event["data"]["id"]=="M3":
                        CMD_SETPANMODE(b'\x05')
                    elif event["data"]["id"]=="M4":
                        CMD_SETPANMODE(b'\x02')
                    sensing = True
                    GETANGLES()
        except:
            print("Smething fail in eventloop!")
            droid.fullSetProperty("volinfo","text","eventloop fail!")
```

Figura 29. Funció eventloop. Font: pròpia.

10. Possibles millores

En aquest apartat es valoren les possibles millores que se li poden arribar a implementar al dispositiu, de manera que si es desitja, es pugui obtenir un estabilitzador amb un disseny més comercial i amb prestacions més desenvolupades.

Un dels principals punts de millora que s'observen a simple vista és la protecció dels components, així com de les seves connexions. Pensant en un futur, estaria bé dissenyar una cobertura al voltant de l'estructura que protegís els cables, el microcontrolador, el sensor i els motors. Per mitjà de la impressió 3D es podrien fer un conjunt de tapes, que anessin acoblades a l'estructura i amaguessin els cables de connexió entre elements, fent també el dispositiu més atractiu estèticament i més protegit. Una altra modificació estètica, però que aquesta ja va més a gust de l'usuari, seria la de pintar el dispositiu de color negre per minimitzar les marques produïdes per la mecanització del material i donar un aspecte més homogeni amb la resta de components.

Un altre punt de millora es troba en el calibratge de l'estabilitzador. Dissenyant un sistema de cargol-guia en les articulacions on es troben els motors, es podria fer que el calibratge a l'hora d'utilitzar diferents càmeres o objectius fos més ràpid i senzill. De la forma en que està confeccionat l'estabilitzador en aquest moment, l'única opció que existeix per fer un calibratge nou és per mitjà de nous forats en la estructura. El sistema de calibratge del dispositiu consistiria en una guia en la zona d'unió del motor, que es subjectés per mitjà d'un cargol en la posició desitjada, de manera que fos senzill equilibrar el centre de gravetat amb l'articulació motoritzada. D'aquesta manera, es podrien fer canvis mínims en l'estructura per tal que el dispositiu quedés perfectament equilibrat, evitant així que els motors haguessin de treballar excessivament per equilibrar la càmera.

Una altra opció de millora del dispositiu és incrementar les prestacions per control remot. A part de modificar la configuració de l'estabilitzador, interessaria poder afegir funcionalitats predeterminades que simplifiquessin algunes accions difícils de dur a terme per control manual. Per exemple, s'ha pensat en la introducció d'unes coordenades inicials i finals i una velocitat a la qual el dispositiu hauria de recórrer la trajectòria marcada per poder capturar aquest moviment de forma estabilitzada. Una altra opció seria aprofitar l'aplicació per iniciar conjuntament aquesta i la pròpia de la càmera, de manera que quan es dugui a terme el calibratge per fer el control amb el telèfon mòbil, també observariem a la pantalla què és el

que està gravant la càmera. Així doncs, s'evitaria haver d'obrir primer una aplicació i després l'altra, i a l'hora de tancar seguir el mateix procediment a la inversa. Aplicar aquesta millora resultaria en la unificació del funcionament de les dues aplicacions en una, fent per a l'usuari un sistema més còmode i senzill d'utilitzar. També es podria implementar el threading o recorregut en semi-paral·lel del codi per tal de captar quan l'usuari vol finalitzar el moviment remot de l'estabilitzador, ja que la funció utilitzada no té fi i actualment s'atura al tancar l'aplicació.

Una opció de millora que sempre està en ment és la de reduir el pes i el volum del dispositiu. Aquesta opció es podria portar a terme realitzant forats a l'estructura d'alumini, sempre i quan no es perdin les propietats mecàniques de resistència i rigidesa necessàries per al correcte funcionament del dispositiu. Una altra millora podria passar pel redisseny del compartiment que conté la bateria i altres components. Una nova forma geomètrica o uns nous components menys voluminosos podrien millorar l'aparença de l'estabilitzador i les seves prestacions.

11. Pressupost

Per calcular el pressupost d'aquest projecte s'han tingut en compte diferents aspectes. Una part molt important és el preu dels components que formen una unitat de l'estabilitzador. També, les eines utilitzades i el temps emprat per dissenyar i fabricar aquest projecte. Així doncs, el desglossament dels components físics que conformen el dispositiu, amb el preu associat, és el que es mostra a continuació (taula 1). S'ha de tenir en compte que el preu dels cargols o dels cables utilitzat és aproximat, ja que no es correspon al preu de compra pel fet de que no tot el que es va comprar es va utilitzar, o sí però amb menor quantitat.

| Component | Preu |
|--|-----------------|
| Microcontrolador + sensor IMU | 22,59 € |
| Mòdul Bluetooth HC-06 | 8,49 € |
| Motors (conjunt de 3 components + cargols) | 85,35 € |
| Bateria | 8,9 € |
| Placa d'alliberament ràpid | 10,99 € |
| Joystick | 1,17 € |
| Interruptor | 2,30 € |
| Visualitzador de capacitat | 6,99 € |
| Placa d'alumini (Estructura) | 32,09 € |
| Cargols + femelles (34x Ø3x16mm) | 2,25 € |
| Cargols + femelles (4x Ø3x20mm) | 0,27 € |
| Cargol (1/4 polsada) | 0 € * |
| Escuma | 0 € * |
| Cables DuPont (Arduino) | 6,88 € |
| Total | 188,18 € |

Taula 1. Pressupost dels components utilitzats en el projecte. Font: pròpia.

*Component reciclat d'un altre projecte i de quantitat mínima, no se li ha considerat un preu.

A l'hora de considerar el preu de les eines que s'han utilitzat en aquest projecte, s'ha decidit fer el supòsit de que es contractava un especialista o ferreter que fabriqués l'estructura amb les seves pròpies eines, unís tots els components a ella i els connectés entre sí; tot a un preu per hora estimat. En aquest projecte s'han fet servir serres, una llima metàl·lica, un punxó, un martell i un trepant amb broques de diferents diàmetres per fer els forats, estany, resina i soldador, tornavisos i una clau anglesa. Aquesta no es una feina pròpia d'un enginyer, sinó d'un operari, i per això s'ha volgut separar els costos d'aquest procés amb el del disseny de l'estabilitzador. Com a aproximació d'aquesta tasca, s'han considerat unes 20 hores de mecanitzat i muntatge, a un preu de 12 €/h segons un especialista de confiança. El preu total del procés de fabricació del dispositiu es pot considerar de 240 €.

Per últim, s'ha de considerar el preu del disseny del prototip, de l'estudi previ a la concepció d'aquest i els redissenys i millores aplicades fins a l'obtenció del dispositiu acabat. A més, haurem de considerar el cost d'amortització de l'ordinador amb el que s'ha treballat, juntament amb la llicència del programa pel disseny tridimensional. S'ha considerat que un ordinador, la inversió del qual va ser de 1.200 € té una vida útil d'uns 4 anys, el que correspon a una amortització de 300 €/any, o el que es el mateix, 0,0347 €/hora. La llicència del programa SolidWorks té un cost de 8.100 €/any, el que correspon a 0,925 €/hora. Tenint en compte que es tracta d'un Treball de Fi de Grau, al qual li corresponen 12 ECTS, considerant que un crèdit representa aproximadament 25 hores i que, un enginyer junior té un preu estimat de 20 €/h, suposant a més, que d'aquestes 300 hores s'han dedicat 100 al disseny tridimensional, es pot arribar a la conclusió que el cost de concepció de l'estabilitzador és de 6.102,91 € (2).

$$C_{enginyer} \cdot h_{disseny} + C_{ordinador} \cdot h_{disseny} + C_{llicència} \cdot h_{3D} = C_{disseny} \quad (2)$$

$$20 \text{ €/h} \cdot 300 \text{ h} + 0,0347 \text{ €/h} \cdot 300 \text{ h} + 0,925 \text{ €/h} \cdot 100 \text{ h} = 6.102,91 \text{ €}$$

Agrupant els tres costos considerats, el pressupost obtingut per a la fabricació d'un estabilitzador per a càmera digital com el descrit és de 6.531,09 €. Tenint en compte que un dels principals objectius del projecte és aconseguir fabricar un dispositiu de característiques similars als que es troben al mercat a un preu inferior; considerant que el cost de concepció i disseny és una inversió a llarg termini; i que el cost dels materials i fabricació és fixa per a cada estabilitzador; a partir de 15 unitats, venudes a un preu de 450 € es recuperaria la inversió i es començaria a obtenir beneficis.

Un altre factor que es podria tenir en compte és el factor d'economia d'escala. Si en comptes de comprar els components d'un en un per fabricar un sol dispositiu se'n comprassin en grans quantitats, és molt probable que el preu de la suma dels components fos més baix. D'aquesta manera es podria abaratir el cost del dispositiu i augmentar els beneficis i/o reduir el preu de venda i augmentar la demanda.

12. Anàlisi Ambiental

Aquest projecte neix de l'idea d'afegir un complement nou a un altre dispositiu com és la càmera de fotografia. És per això, que es podria dir que es parteix d'un impacte ambiental negatiu, ja que s'han de mecanitzar materials com l'alumini que és contaminant i pot ser perjudicial per la salut i s'han de fabricar bateries de liti i polímer que tenen el gran inconvenient de ser difícils de reciclar.

El procés de fabricació de l'alumini té uns quants inconvenients. A l'hora d'extreure la bauxita, mineral del qual s'obté l'alumini, es requereixen d'explotacions mineres a cel obert que eliminen part de la fauna que existia en el territori. El procés de fusió de l'alumini produeix emissions de diòxid de carboni i altres gasos responsables de l'efecte hivernacle. L'avantatge que té l'alumini és que és un material fàcilment reciclable, la seva vida útil és il·limitada i al reciclar-lo s'estalvia fins a un 90% d'energia que s'utilitzaria per la producció d'alumini a partir de bauxita, segons indiquen a un article de *En Buenas Manos* [33].

Un altre gran punt a favor de l'alumini és que té una alta resistència a la degradació i la corrosió, de manera que el dispositiu fabricat podrà tenir una vida útil molt gran i amb pràcticament zero manteniment.

En quant a la fabricació de bateries de liti i polímer, són considerades altament inflamables i que poden comportar un problema de salut si s'utilitzen de manera inadequada. A més, estan formades per metalls pesants com el cobalt, que pot contaminar l'aigua de rius i subministres si no es reciclen adequadament. Una altra qüestió important és el tema del reciclatge, ja que aquestes bateries són difícils de reciclar degut a l'alt cost energètic que representa aquest procés, cosa que fa que en els països europeus només es reciclin el 5% de les bateries de liti que es fabriquen, segons assegura un article de Nobbot [34].

Tot i això, existeix una part positiva en utilitzar bateries recarregables. El seu ús permet evitar la compra excessiva de piles alcalines, també molt contaminants i difícils de reciclar. Una bateria de liti d'uns 3000 mAh es pot recarregar unes 500 vegades abans de que perdi gran part de la seva capacitat per emmagatzemar energia. Això equival a unes 63 piles alcalines d'un sol ús.

Conclusions

Les principals conclusions d'aquest projecte es basen en funció als objectius que s'havien marcat al principi. Així doncs, es buscava comprendre el funcionament d'un estabilitzador de tres eixos per a càmera digital, la fabricació d'un prototip que satisfés gran part de les necessitats que pogués trobar algú que es dedica professionalment a enregistrar vídeo, i que aquesta opció no resultés molt cara tenint en compte altres projectes similars que es troben al mercat.

Amb la realització d'aquest projecte, ha quedat clar quin és el funcionament mecànic del dispositiu que estabilitza una càmera digital, així com els components necessaris per la fabricació d'un prototip funcional. Si bé la part central del projecte, i la més complexa, com és el microcontrolador ha quedat fora de l'abast d'aquest treball, seria molt interessant dedicar un altre projecte a l'estudi, disseny i fabricació de la placa del microcontrolador, ja que és on es basa el correcte funcionament del dispositiu. La seva complexitat en la fabricació i en el disseny el porten a un grau d'especialització en la electrònica de control bastant avançat. Posant a part el microcontrolador, l'estudi i disseny de l'estabilitzador ha tret a la llum molts coneixements apresos durant el grau d'Enginyeria Industrial corresponents a molts departaments diferents, fent així d'aquest, un projecte interessant per comprendre la feina d'un enginyer.

Enllaçant amb el punt anterior, un enginyer ha de saber quin és el seu paper dins d'un projecte, entenent on és més útil i perquè se'l necessita. A l'hora de construir el prototip, s'han desaprofitat moltes hores degut a la inexperiència o la falta de recursos pròpi d'algú que no es dedica a la fabricació o mecanització de metall. Així doncs, s'ha de comprendre que hi ha feines que és millor delegar-les a un especialista, comportant així en una millora tant en el qualitat del resultat com també en els beneficis i el temps dedicat al disseny del projecte.

En quant a les opcions que té aquest dispositiu en el mercat, és evident que es tracta d'un prototip i que, noves millores pensades s'haurien d'aplicar per arribar en algun moment a ser un competidor en un mercat amb grans marques i de gran competència especialitzada. Si bé el projecte ha resultat més econòmic que altres opcions de compra, el marge és molt escàs (per exemple, el Moza Air es ven a tan sols 70 € més que el que ha costat el prototip) i les prestacions inferiors. Ara bé, el gran punt a favor que té aquest dispositiu i que en certa manera podria expandir-se a altres marques o dispositius és el fet d'utilitzar el moviment del

telèfon mòbil per copiar el moviment que hauria de fer la càmera. Això ens porta al món de la tecnologia en Realitat Virtual, on utilitzant un adaptador que situa el teu telèfon mòbil en front de la teva vista, permetria viure l'experiència de gravar o capturar aquell moment de la manera que tu desitges, per poder expressar allò que et fa sentir, la teva manera de veure les coses.

Bibliografia

En aquest apartat es fa un recull de les referències utilitzades durant el transcurs d'aquest projecte, sense les quals no s'hagués pogut completar de la forma en que es presenta i, ajuda de la qual ha estat molt útil pel correcte disseny i prototipatge de l'estabilitzador. Així doncs, es recullen els vídeos DIY rellevants en la execució del projecte, les informacions recollides en l'estudi previ del disseny, així com les opcions de mercat i els enllaços de compra dels components utilitzats per la fabricació de l'estabilitzador.

- [1] WIKIPEDIA. Do it yourself [https://en.wikipedia.org/wiki/Do_it_yourself, 26/10/2018]
- [2] WIKIPEDIA. Gimbal [<https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal>, 04/10/2018].
- [3] VIQUIPÈDIA. Interfície gràfica d'usuari [https://ca.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%ADcie_gr%C3%A0fica_d%27usuari, 26/12/2018].
- [4] WIKIPEDIA. Inertial measurement unit [https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit, 06/10/2018].
- [5] Batalla Lapeyra, M. (2018) *Longboard elèctric. Disseny, motorització i control remot d'una taula convencional*. (Treball de fi de grau). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.
- [6] DJI. Ronin 2 [<https://www.dji.com/es/ronin-2?site=brandsite&from=nav>, 26/10/2018].
- [7] Zhiyun-tech. Crane 2 [<https://www.zhiyun-tech.com/crane2/en>, 26/10/2018].
- [8] DJI. Osmo [<https://www.dji.com/es/osmo?site=brandsite&from=nav>, 26/10/2018].
- [9] Gopro. Karma Grip [<https://es.shop.gopro.com/accessories-3/karma-grip/AGIMB-004-master.html>, 26/10/2018].
- [10] DJI. Mavic Pro 2 [<https://store.dji.com/es/product/mavic-2?vid=45291>, 26/10/2018].
- [11] DJI. Ronin-S [<https://www.dji.com/es/ronin-s>, 26/10/2018].
- [12] Gimbal Guru. Moza Air [<https://gimbalguru.com/collections/stabilizers/products/moza-air>, 26/10/2018].

- [13] DIY Brushless Camera Gimbal [<https://www.youtube.com/watch?v=q7fLAcMj0M8>, 22/10/2018].
- [14] DIY 3-axis Brushless Gimbal for Next5N. Step by step build [<https://www.youtube.com/watch?v=K5PByCrXmIk>, 22/10/2018].
- [15] Carbon Fiber DSLR 3 Axis Gimbal Build – Start to Finish [<https://www.youtube.com/watch?v=thlNRZtUvEg> 22/10/2018]
- [16] Sony α7II [<https://www.sony.es/electronics/camaras-lentes-intercambiables/ilce-7m2-body-kit>, 26/10/2018].
- [17] Fenollosa Coral, J. (1993) *Unions Cargolades*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya
- [18] AMAZON. StorM32 BGC 32Bit 3-Axis Brushless Gimbal Controller V1.31 DRV8313 Motor Drive [https://www.amazon.com/Storm32-3-Axis-Brushless-Controller-DRV8313/dp/B07KC2G3PW/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1546431370&sr=8-3&keywords=storm32, 01/11/2018].
- [19] AMAZON. DSD TECH HC-06 – Módulo de soporte inalámbrico Bluetooth Serial Transceiver para Arduino [https://www.amazon.es/gp/product/B01FCQZ8VW/ref=oh_aui_detailpage_o03_s00?ie=UTF8&psc=1, 12/11/2018].
- [20] ALIEXPRESS. iPower brushless Gimbal Motor GBM4108H-120T [<https://www.aliexpress.com/item/iPower-Brushless-Gimbal-Motor-GBM4108-4108-Hollow-Shaft-for-Sony-NEX-ILDC-Camera-Gimbal-VS-DYS/32633790265.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.206c4c4dcnBNfi>, 01/11/2018].
- [21] ALIEXPRESS. iPower Motor GBM6324H-180T Brushless Gimbal Motor [<https://www.aliexpress.com/item/FTBO-Brushless-Gimbal-Motor-GBM6324-180T-w-Slipping-Sealed-Case-for-DSLR-FPV-Aerial-Photography/1552839302.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.206c4c4dcnBNfi>, 01/11/2018].
- [22] ALIEXPRESS. Kedanone NWE 12 V 3000 mAh 18650 Li-ion Rechargeable battery [<https://www.aliexpress.com/item/kedanone-NWE-12-V-3000-mAh-18650-Li-ion-Rechargeable-battery-and-12-6V-1A-Charger/32900443110.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.206c4c4dcnBNfi>, 01/11/2018].

- [23] AMAZON. Camera 323 Quick Release Adapter For Manfrotto Tripod [https://www.amazon.com/koolehaoda-Release-Adapter-Manfrotto-200PL-14/dp/B010GVGBUK/ref=sr_1_17?ie=UTF8&qid=1546511472&sr=8-17&keywords=konsait+quick+release, 01/11/2018].
- [24] ALIEXPRESS. Game Controller Dual Rocker Joystick Sensors [https://www.aliexpress.com/item/Game-Contoller-Dual-Rocker-Joystick-Sensors-For-PS2-Game-Rocker-Joysticks-Sensor-Electronic-PCBA-Block-Module/32837057580.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.206c4c4dcnBNfi, 12/11/2018].
- [25] Como instalar un cortacorriente [http://www.sobre4ruedas.com/noticias/como-instalar-un-corta-corriente-al-auto/, 29/11/2018].
- [26] AMAZON. Probador de capacidad de batería de litio [https://www.amazon.es/gp/product/B06XSJMQ8T/ref=oh_aui_detailpage_o02_s00?ie=UTF8&psc=1, 01/11/2018].
- [27] ALIEXPRESS. 6061 Aluminum Plate 320x320 mm 6 mm thickness [https://www.aliexpress.com/item/6061-aluminum-plate-aluminium-sheet-320mmx320mm-thickness-6mm-320x320x6-aluminum-alloy-diy-1pcs/32831580220.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.1d3a4c4dBzGEMS, 01/11/2018].
- [28] OlliW StorM32 NT brushless gimbal controller documentation [http://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/Main_Page, 26/09/2018].
- [29] DIY StorM32 BGC 3-axis brushless gimbal – Android Control UI [https://www.youtube.com/watch?v=n-l0-q7tzmc, 12/12/2018].
- [30] Olliw Bluetooth module HC06 [http://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/Bluetooth_Module_HC06, 12/12/2018].
- [31] Olliw Serial Communication [http://www.olliw.eu/storm32bgc-wiki/Serial_Communication, 12/12/2018].
- [32] WIKIPEDIA. Cyclic Redundancy Check [https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check, 15/12/2018].
- [33] En Buenas Manos. Como afecta la contaminación del aluminio

[<https://www.enbuenasmanos.com/contaminacion-del-aluminio#el-aluminio>, 13/12/2018].

- [34] Nobbot. El reciclaje de las baterías de litio, otro obstáculo para el coche eléctrico [<https://www.nobbot.com/general/reciclaje-baterias-coche-electrico/>, 15/12/2018].

Bibliografia complementària

- [35] Lorandi Medina, A. P. Hermida Saba, G. Ladrón de Guevara Durán, E. Hernández Silva, J. (2011) *Controladores PID y Controladores Difusos*. Revista de la Ingeniería Industrial, Volumen 5, Nº 1.